

21.03.2003

5

10 Vorrichtung und Verfahren zur optimierten elektrohydraulischen
Druckpulserzeugung

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur optimierten elektrohydraulischen Druckimpulserzeugung.

15

Stand der Technik

Mit elektrohydraulischen Stoßwellensystemen werden Druckimpulse erzeugt, indem über einen RLC - Entladekreis eine Spannung zwischen zwei in Flüssigkeit befindlichen Elektroden angelegt wird, sich bei der Entladung zwischen den Elektroden ein Plasma bildet und von diesem eine Druckwelle ablöst.

Die Eigenschaften der Druckwelle hängen entscheidend vom Entladestrom und von der Ladespannung ab. Diese wiederum ergeben sich aus den Parametern des RLC - Kreises, der angelegten Spannung und der Geometrie der Elektrodenanordnung.

In DE 40 20 770 ist die Charakteristik der Entladekurven von Strom und Spannung veranschaulicht. In herkömmlichen Systemen handelt es sich um eine gedämpfte Schwingung.

Das Durchschlagen der Entladespannung zwischen den Spitzen der Elektroden, welche sich meist in wässriger Lösung befinden, ist ein statistischer Effekt, da lokale physikalische Zustände des elekt-

rischen Feldes sowie die Inhomogenitäten des zwischen den Spitzen befindlichen Mediums die Ausbildung des Lichtbogens und des Plasmas einer starken Variation unterwerfen. Die Reproduzierbarkeit der Entladung wird weiter erschwert durch die Tatsache, dass sich
5 die Elektrodenspitzen nach mehrfachen Entladungen abnutzen, was neben der Veränderung ihrer Oberflächenrauigkeit zu einer Vergrößerung des Elektrodenabstandes durch Materialverlust aus den Spitzen führt. Dadurch erhöht sich im Laufe der Benutzungszeit die Mindestspannung, die notwendig ist, um überhaupt einen Durchschlag
10 zu erreichen.

Aus DE 40 20 770 ist bekannt, dass der Problematik begegnet werden kann, indem als Flüssigkeit, in der sich die Elektroden befinden, ein stark leitender Elektrolyt verwendet wird. Die Entladung wird
15 dann zu einer vom kritisch gedämpften Typ, in der die Latenzzeit, d.h. die Zeit bis zum Durchschlag, praktisch völlig unterdrückt wird, da die elektrische Energie direkt in die Bildung einer Dampfblase und damit eine Druckwelle umgesetzt wird und gar nicht erst ein Plasma entsteht.

20

Diese Vorrichtung erfordert jedoch eine sehr sorgfältige Kontrolle des Elektrodenabstands, da das System sehr empfindlich darauf reagiert.

25 Eine andere Vorgehensweise ist in EP 0911 804 dargestellt. Hier ist eine Vorrichtung beschrieben, mit der sich die direkt geregelte Größe, d.h. die Spannung und deren Verlauf gemessen wird und aufgrund einer Abweichung von einem Spannungssollwert der Abstand der Elektroden variiert wird. Der Sollwert ist so bestimmt, dass
30 bei seinem Vorliegen die optimale Umsetzung von elektrischer in Druckenergie stattfindet. Die Distanzzunahme der Elektrodenspitzen kann also korrigiert werden und es erhöht sich die Lebensdauer der Elektrode, bevor sie ausgewechselt werden muss. Die einzelnen Stoßwellen sind einander ähnlicher, weil sie zumindest bei glei-
35 cher Elektrodengeometrie erzeugt werden. Je nachdem, ob mit einem

konstantem oder veränderbaren Referenzwert gearbeitet wird, kann der Elektrodenabstand vergrößert oder verkleinert werden.

5 Eine Spannungsmessung an einem Hochspannungs-Entladekreis ist jedoch schwierig durchzuführen. Die Fehleranfälligkeit durch die Einstreuung von Störungen ist sehr hoch.

10

Aufgabe der Erfindung

Die Aufgabe der Erfindung besteht darin, eine Vorrichtung und ein Verfahren zur optimierten elektrohydraulischen Druckimpulserzeugung vorzustellen, durch die charakteristische Kenngrößen aufgenommen werden, die störungsanfällig messbar und mit Sollwerten vergleichbar sind. Eine Spannungsmessung allein ermöglicht außerdem keine Aussage über die Energieumwandlung zwischen den Elektroden-
15 denspitzen.

20

Lösung der Aufgabe

25 Die Aufgabe wird gelöst durch eine Vorrichtung, bei der ein elektrohydraulische Stoßwellensystem mit einer Mess- und Kontrolleinrichtung versehen ist, die den Entladestrom zwischen den Elektroden-
spitzen misst, sowie einem Verfahren, das unter Verwendung der Vorrichtung Einfluss auf die Systemparameter nimmt.

30

Vorteile der Erfindung

Der Entladestrom weist gegenüber der Entladespannung eine gewisse Phasenverschiebung auf. Er erreicht sein Maximum erst, wenn die
35 Entladespannung drastisch abgenommen hat. Die Latenzzeit ist die

Zeit der Stromkurve, innerhalb derer trotz angelegter Spannung praktisch kein Strom fließt. In dieser Zeit verringert sich die eingebrachte Energie durch den ohmschen Widerstand des wässrigen Mediums, außerdem bilden sich erste Vorentladungskanäle zwischen
5 den Spitzen der Elektroden. Doch erst, wenn ein Plasma-Kanal entsteht, findet der elektrische Durchbruch statt und es kann sich um den Funkenkanal eine Druckwelle ausbilden. Der Entladevorgang hat die Form einer gedämpften Schwingung, wobei die Parameter von Widerständen, Kapazitäten und Induktivitäten, sowie die Geometrie
10 der Elektroden die Dämpfung bestimmen. Das System schwingt solange, bis die elektrische Energie, die im Entladekondensator gespeichert ist, vollständig in den Druckpuls, in Licht, in Anregungszustände, in Wärme u.a. umgesetzt ist. Der Druckimpuls wird jedoch nur während der ersten Entladung, also bis zum zweiten Nulldurchgang der Stromkurve, generiert. Das System ist deshalb so auszulegen,
15 dass möglichst weitere Schwingungen vermieden werden, also im aperiodischen Grenzfall oder zumindest in dessen Nähe gearbeitet wird.

20 Als Messmittel können Standardvorrichtungen zur Strommessung benutzt werden, wie eine Rogowski Coil, ein Shunt oder andere aus dem Stand der Technik bekannten Messmittel.

Mit den Ergebnissen der Strommessung kann jederzeit kontrolliert
25 werden, ob die Erzeugung der Druckimpulsen noch im gewählten Schwingungsbereich stattfindet und wenn dies nicht der Fall ist, besteht die Möglichkeit, Einfluss auf die einstellbaren Parameter zu nehmen.

30 In einer vorteilhaften Weiterführung wird nun neben dem Strom mittels der Mess- und Kontrolleinheit die Entladespannung gemessen. Das Vorliegen beider Messkurven verringert die Fehleranfälligkeit gegenüber äußeren Störeinflüssen und erlaubt die Berechnung weiterer Auswertekenngrößen wie die eingebrachte Energie zu einem be-

stimmten Zeitpunkt.

In einer vorteilhaften Weiterbildung erfasst die Mess- und Kontrolleinheit direkt die Entladeleistung, vorzugsweise durch eine
5 kombinierte Strom- und Spannungsmessung. Im optimalen Arbeitsbereich wird Leistung nur während der ersten elektromagnetischen Schwingung umgesetzt.

Die Vorrichtung wird vorteilhaft weitergebildet, indem die Mess-
10 und Kontrolleinheit mindestens einen Mess- oder Kontrollwert mit mindestens einem Sollwert vergleicht. Der Sollwert oder die Sollwerte, beispielsweise die Latenzzeit, ein maximaler Stromwert, ein bestimmter Leistungswert zu einer bestimmten Zeit oder ein bestimmter Stromverlauf sind durch eine anfängliche optimale System-
15 einstellung oder durch eine willkürliche Vorwahl, die sich an theoretischen Berechnungen oder vorherigen Messungen orientiert, festgelegt. Die Mess- und Kontrolleinheit gibt die Abweichung bzw. den Grad der Abweichung der Messwerte von dem oder den Sollwerten an.

20 Die Sollwerte können jedoch auch relative Größen sein. Beispielsweise sind die Parameter des RLC Kreises und der Elektrodenabstand anfänglich so gewählt, dass eine aperiodische Entladung stattfindet. Dann soll möglichst bei allen weiteren Entladungen
25 gewährleistet sein, dass das zweite Strommaximum einen Absolutwert hat, der geringer als ein Viertel des ersten Strommaximums ist. In diesem Fall ist der Sollwert eine aus einem ersten Messwert ermittelte Größe. Der Sollwert muss dann nicht bei jedem gewollten Parameterwechsel, z.B. bei der Wahl einer anderen Entladespannung,
30 neu festgelegt werden.

Als weitere Möglichkeit kann der Vergleich mit einer Kombination von Sollwerten vorgenommen werden. Zunächst wird geprüft, ob die erste Stromamplitude überhaupt ausreicht, um einen Funken zu er-
35 zeugen, und in einem zweiten Abgleich, ob das zweite Maximum klein

genug ist, dass die Entladung nahe des aperiodischen Grenzfalls stattfindet.

Da der Entladevorgang ein statistischer Prozess ist, kann es sinnvoll sein, die Messwerte über mehrere Entladungen zu mitteln und diesen Mittelwert mit dem oder den Sollwerten zu vergleichen.

In einer weiteren vorteilhaften Ausführung der Vorrichtung ist der Elektrodenabstand variabel. Ist die Abweichung zu den Sollwerten zu groß, oder entsprechen die gemessenen Werten nicht mehr einem gewünschten Profil, so kann der Abstand zwischen den Elektroden verändert und damit wieder ein anderer Entladebereich erzielt werden. Dazu können entweder beide Elektroden ihre Position verändern, oder eine Elektrode gegenüber der anderen verschoben werden. Bei einer durch Reflexion fokussierten Stoßwelle sollte der Spalt zwischen den Elektroden jedoch möglichst im Brennpunkt verbleiben. Die Elektroden werden durch Stellglieder verschoben. Dieses werden mittels eines Motors mit Getriebe, eines Schrittmotors, eines piezokeramischen Antriebes, eines induktiven Magnetens, einer Hydrauliken, Pneumatik oder eines anderen bekannten Antriebes betrieben.

In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung korrigiert die Mess- und Kontrolleinheit bei Abweichung von mindestens einem Mess- oder Kontrollwert von mindestens einem Sollwert oder bei Abweichung von Mess- und Kontrollwertkurven von Sollwertkurven den Elektrodenabstand und nimmt damit selbsttätig Einfluss auf die Entladecharakteristik.

Dem Abnutzungseffekt der Elektroden kann zum Beispiel entgegengewirkt werden, indem z.B. eine Elektrode in ihrer Position durch einen Motor veränderlich und der Abstand zwischen den Elektroden sollte möglichst konstant gehalten wird. Dies wird mit der erfindnerischen Vorrichtung ohne direkte Abstandsmessung ermöglicht, nämlich durch eine Kontrolle der Entladecharakteristik.

- Die Einstellbarkeit des Elektrodenabstands erfordert aufwändige technische Mittel, nämlich den gesamten Stellmechanismus zur Bewegung mindestens einer Elektrode. Bestehen die Elektroden nicht aus einem beliebig nachführbaren Draht, so ist die Lebensdauer der Elektroden ohnehin beschränkt und ein Austausch der Elektroden unerlässlich. Eine weitere vorteilhafte Weiterbildung der erfindungsgemäßen Vorrichtung erlaubt daher, dass die Mess- und Kontrolleinheit bei Abweichung von mindestens einem Mess- oder Kontrollwert von mindestens einem Sollwert oder bei Abweichung von Mess- und Kontrollwertkurven von Sollwertkurven die Ladespannung korrigiert. Bei abnutzungsbedingtem, größer werdendem Elektrodenabstand muss eine immer höhere Ladespannung angelegt werden, um eine in etwa gleichbleibende Entladecharakteristik zu garantieren.
- 15 Die Vorrichtung kann nicht nur dazu benutzt werden, um die gleichbleibende Qualität einer einmal gewählten Systemeinstellung zu gewährleisten, sondern auch, um ein Stoßwellenerzeugungssystem anzufahren. Dazu werden die Sollwerte willkürlich vom Betreiber festgelegt, und die Stellgrößen durch die Mess- und Kontrolleinheit solange variiert, bis sich das System im gewünschten Arbeitsbereich befindet.

- Bevorzugt werden die aufgeführten erfinderischen Vorrichtungen bei der extrakorporalen Zertrümmerung von Konkrementen in Menschen oder Säugetieren oder zur extrakorporalen Behandlung von allen anderen Geweben in diesen verwendet. Gerade wenn ein elektrohydraulisches Stoßwellengerät mit einem Elektrodenatz nacheinander an unterschiedlichen Behandlungsgebieten eingesetzt werden soll, müssen die erzeugten Druckwellen einstellbar sein. Diese Einstellung kann nur über die Entladecharakteristik vorgenommen werden. Bei einer Behandlung an einem Behandlungsort soll diese möglichst konstant bleiben, was durch die Verwendung der erfindungsgemäßen Vorrichtung gewährleistet werden kann.

Ein Verfahren zur Generierung optimierte Druckpulse an elektrohydraulischen Stoßwellensystemen ist durch folgende Verfahrensschritte gekennzeichnet:

- 5 a) Einstellung des RLC Kreises und des Elektrodenabstandes an einen elektrohydraulischen Stoßwellensystem auf gewählte Anfangsparameter,
- b) Entladevorgang auslösen,
- c) Erfassung des Entladestroms und mindestens eines Messwerts durch einen Mess- und Kontrolleinrichtung,
- 10 d) Vergleich mit mindestens einem Sollwert,
- e) Korrektur eines Systemparameters, z.B. der angelegten Ladespannung oder des Elektrodenabstandes, um einen von der Abweichung zum Sollwert abhängigen Korrekturschritt,
- f) weiter mit b)
- 15 Das Verfahren ist deshalb besonders vorteilhaft, da sich die Systemgrößen bei jeder Stoßwellenerzeugung nur minimal ändern, nach jeder Entladung eine Korrektur vorgenommen werden kann und insgesamt bei jeder Behandlung so viele Entladungen vorgenommen werden, dass sich das System durch sukzessives Durchlaufen des Verfahrens
- 20 stabilisieren kann. Es ist also nicht nötig „Testentladungen“ durchzuführen, die nur zum Einstellen des Systems dienen, sondern die Optimierung kann während des Betriebs vorgenommen werden.

25 In einem alternativen Verfahren werden die Messwerte über mehrere Entladungen aufgesammelt und gemittelt, bevor sie mit einem oder mehreren Sollwerten verglichen werden.

Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen gehen aus der nachfolgenden Beschreibung sowie den Ansprüchen hervor.

30

35

Zeichnungen

Es zeigen:

5 Figur 1a eine vereinfachte Darstellung des Spannungsverlaufs zwischen den Elektroden bei einer gedämpften Schwingung;

10 Figur 1b eine vereinfachte Darstellung des Stromverlaufs zwischen den Elektroden bei einer gedämpften Schwingung;

Figur 2a eine vereinfachte Darstellung des Stromverlaufs in der Nähe des aperiodischen Grenzfalls;

15 Figur 2a eine vereinfachte Darstellung des Stromverlaufs im aperiodischen Grenzfall;

Figur 3a ein Blockschaltbild eines Ausführungsbeispiels einer erfindungsgemäßen Vorrichtung.

20

Beschreibung der Ausführungsbeispiele

Figur 1a zeigt eine vereinfachte Darstellung des Spannungsverlaufs zwischen den Elektroden bei einer gedämpften Schwingung. Nach einer ersten Zeit t_1 liegt die maximale Spannung zwischen den Elektroden an. Bis zu einer Zeit t_2 , der Zündverzugs- oder Latenzzeit ist der Weg zwischen den Elektroden bereits leicht leitend, da bereits Elektrolyse einsetzt und sich der ohmsche Widerstand durch eingebrachte Energie verringert. Weitere Prozesse, wie die Bildung erster Vorentladungskanäle, finden statt. Nach der Zeit t_2 setzt der Elektrische Durchbruch ein, es bildet sich der Plasmakanal und um den Funkenkanal entsteht eine Druckwelle. Die Spannung bricht sehr schnell zusammen und der Entladekondensator entlädt sich in einer gedämpften Schwingung, deren Dämpfungsparameter durch den Elektrodenabstand, das Medium zwischen den Elektroden und dem RLC

25

30

35

Kreis bestimmt ist.

In Figur 1b ist der zugehörige Stromverlauf gezeigt. Während der Latenzzeit ist der Entladestrom zwischen den Elektroden noch sehr
5 klein. Sobald der elektrische Durchschlag bei der Zeit t_2 einsetzt, beginnt der eigentliche Stromfluss zwischen den Elektroden. Die Schwingungsumkehr findet solange statt, bis die elektrische Energie, die im Entladekondensator gespeichert war, vollständig in andere Energieformen umgesetzt ist.

10

Der Druckpuls wird jedoch nur während der Zeit der ersten Entladung vor dem zweiten Nulldurchgang des Stromes bei der Zeit t_3 gebildet. Eine System zur Druckimpulserzeugung ist daher so zu be-
reiben, dass der wesentliche Teil der angelegten Energie bis zu
15 diesem Zeitpunkt umgesetzt wird.

Figur 2a zeigt eine vereinfachte Darstellung des Stromverlaufs in der Nähe des aperiodischen Grenzfalls. Um überhaupt einen Durchschlag zu erreichen, sollte das erste Strommaximum 1 einen Mindestwert erreichen, der als Sollwert festgelegt werden kann. Eine
20 gute Energieausnutzung kann dann erreicht werden, wenn der Absolutwert des zweiten Maximums 2 kleiner als 25% des ersten Maximalwert 1 ist.

25

Die optimalen Bedingungen liegen im aperiodischen Grenzfall vor. Figur 2b zeigt eine vereinfachte Darstellung des Stromverlaufs in diesem Fall. Die Amplitude des rückfließenden Stroms ist dann praktisch null.

30

Figur 3a zeigt ein Blockschaltbild eines Ausführungsbeispiels einer erfindungsgemäßen Vorrichtung.

Der Druckpuls wird an einer Elektrode 3 erzeugt, die zwei Spitzen 4,5 aufweist, zwischen denen ein Abstand 6 vorliegt.

Die Elektrode ist aus einem Außenleiter 7 und einem durch einen Isolator 8 abgetrennten Innenleiter 9 aufgebaut. Die Elektrodenspitze 4 ist mit dem Außenleiter 7 über einen Elektrokorb aus Metalldraht 10 verbunden. Der Innenleiter 9 kann mit einem Motor 11 über ein Getriebe 12 verstellt werden. Erhalten Motor 11 und Getriebe 12 über eine Kontrolleinheit einer Mess- und Kontrolleinrichtung 13 b ein Stellsignal von einem Controller 14, wird der Innenleiter 9 in Rotation versetzt und bewegt sich in einem in der Zeichnung nicht dargestellten in dem Isolator 8 ausgeführten Gewinde je nach Drehrichtung des Motors auf die Elektrodenspitze 4 zu oder von dieser weg. Ein Sensor 15 erfasst dabei die absolute oder relative Position des Innenleiters 9.

Eine Messeinheit der Mess- und Kontrolleinrichtung 13a misst den Strom zwischen den Kontaktstellen am Innenleiter 16 und am Außenleiter 17, und damit zwischen den Elektrodenspitzen 4,5.

Die Druckwellengenerierung wird durch die Aufschaltung der Spannung des Entladekreises 18 über die Kontakte 16 zum Innenleiter und 17 zum Außenleiter erreicht. Der Entladekreis 18 wird von einem Hochspannungserzeuger 19 gespeist. Die Energie wird im Entladekreis 18 gespeichert, bis durch das Schalten eines in der Zeichnung nicht gezeigten Hochspannungsschalters, z.B. eines Spark Gaps oder eines Thyratrons, die Spannung an die Kontakte 16,17 gelegt wird.

Nach jeder Entladung wird der Entladekreis 18 von dem Hochspannungserzeuger 19 wieder auf die gewählte Spannung geladen. Aus Sicherheitsgründen liegt der Außenleiter der Elektrode 7 häufig auf Massepotential.

In einer ersten Benutzungsvariante vergleicht die Kontrolleinheit der Mess- und Kontrolleinrichtung 13b die gemessene Stromwerte, bzw. die Spannungswert mit einem oder mehreren Sollwerte und gibt dann ein Signal zum Verstellen des Elektrodensabstands 6. In einer zweiten Betriebsvariante bleibt der Abstand 6 fest. Die Kontroll-

einheit der Mess- und Kontrolleinrichtung 13b gibt ein Signal an den Hochspannungsgenerator 19 zur Wahl der angelegten Spannung.

- 5 Die Messeinheit 13a und die Kontrolleinheit 13b der Mess- und Kontrolleinrichtung können, wie in diesem Blockschaltbild angedeutet, getrennt ausgeführt sein, oder in einem Bauteil angeordnet werden.

21.03.2003 Gf/Hl

5

A N S P R Ü C H E

- 10 1. Vorrichtung zur optimierten elektrohydraulischen Druckpulserzeugung, dadurch gekennzeichnet, dass ein elektrohydraulisches Stoßwellensystem mit einer Mess- und Kontrolleinrichtung (13a,13b) versehen ist, die den Entladestrom zwischen den Elektroden spitzen (4,5) misst.
- 15 2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass Mess- und Kontrolleinrichtung (13a,13b) die Entladespannung misst.
- 20 3. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass Mess- und Kontrolleinrichtung (13a,13b) die Entladeleistung bestimmt.
- 25 4. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass Mess- und Kontrolleinrichtung (13a,13b) mindestens einen Mess- oder Kontrollwert mit mindestens einem Sollwert vergleicht.
- 30 5. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Elektrodenabstand (6) variabel ist.
6. Vorrichtung nach Anspruch 5 dadurch gekennzeichnet, dass Mess- und Kontrolleinrichtung (13a,13b) bei Abweichung von mindestens einem Mess- oder Kontrollwert von mindestens einem

Sollwert oder bei Abweichung von Mess- und Kontrollwertkurven von Sollwertkurven den Elektrodenabstand (6) korrigiert.

- 5 7. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass Mess- und Kontrolleinrichtung (13a,13b) bei Abweichung von mindestens einem Mess- oder Kontrollwert von mindestens einem Sollwert oder bei Abweichung von Mess- und Kontrollwertkurven von Sollwertkurven die Ladespannung
- 10 korrigiert.
- 15 8. Verwendung einer Vorrichtung nach einem der oben genannten Ansprüche zur extrakorporalen Zertrümmerung von Konkrementen in Menschen und Säugetieren oder zur extrakorporalen Behandlung von Geweben.
- 20 9. Verfahren zur Generierung optimierter elektrohydraulischen Druckpulse durch folgende Verfahrensschritte gekennzeichnet:
- 25 a) Einstellung des RLC Kreises und des Elektrodenabstandes an einen elektrohydraulischen Stoßwellensystem auf gewählte Anfangsparameter,
- 30 b) Entladevorgang auslösen,
- 35 c) Erfassung des Entladestromes und mindestens eines Messwerts durch einen Mess- und Kontrolleinrichtung (13a, 13b),
- d) Vergleich mit mindestens einem Sollwert,
- e) Korrektur eines Systemparameter um einen von der Abweichung zum Sollwert abhängigen Korrekturschritt;
- f) weiter mit b)

21.03.2003 Gf/Hl

5 SWS Shock Wave Systems AG
Wilten 4
CH 8574 Illighausen

10 Vorrichtung und Verfahren zur optimierten elektrohydraulischen
Druckpulserzeugung

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur op-
timierten elektrohydraulischen Druckimpulserzeugung, durch die in
15 charakteristische Kenngrößen aufgenommen werden, die störunanfäl-
lig messbar und mit Sollwerten vergleichbar sind. Die Aufgabe wird
gelöst durch eine Vorrichtung, bei der ein elektrohydraulische
Stoßwellensystem mit einer Mess- und Kontrolleinrichtung (13a,13b)
versehen ist, die den Entladestrom zwischen den Elektroden spitzen
20 (4,5) misst, sowie einem Verfahren, das unter Verwendung des der
Vorrichtung Einfluss auf die Systemparameter nimmt.